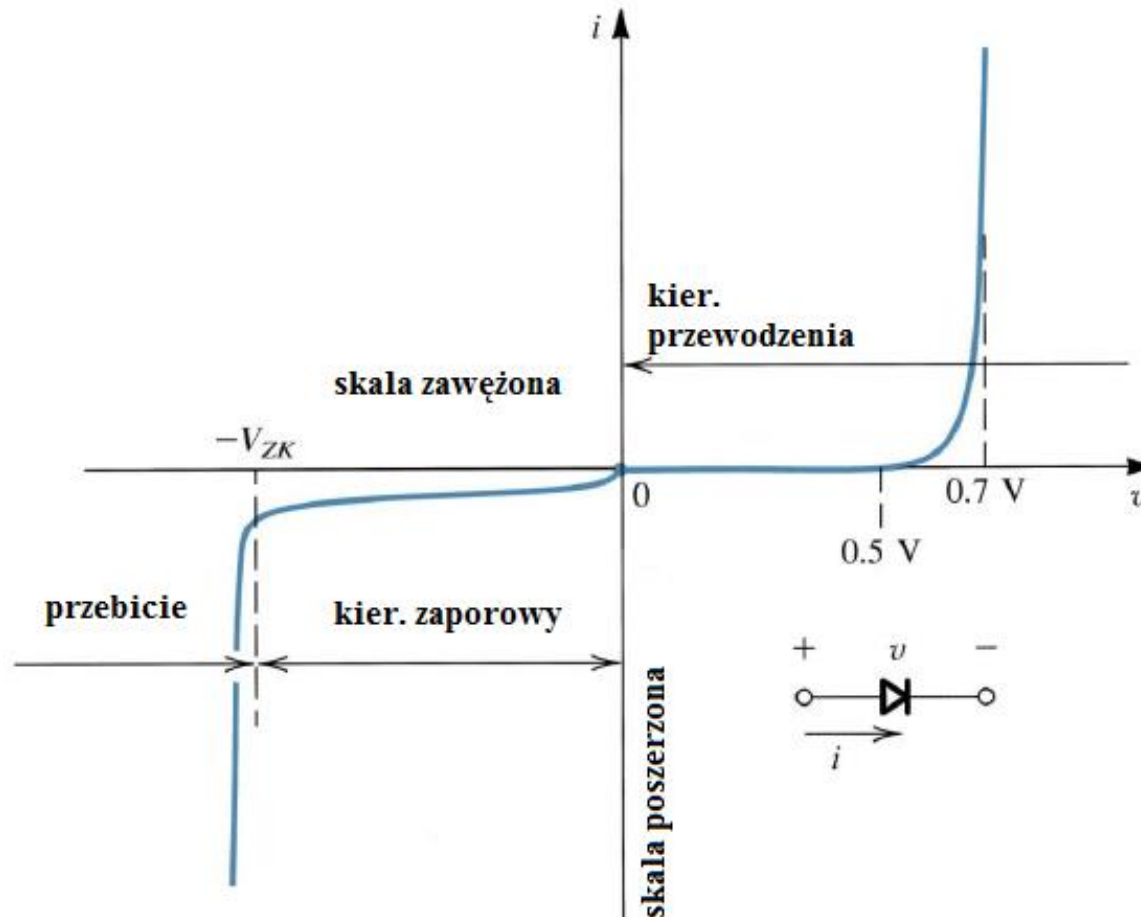


WYKŁAD 7

Równanie Shockley'a. Budowa i zasada działania wybranych przyrządów półprzewodnikowych (dioda prostownicza, dioda Zenera, LED, fotodioda, tranzystor polowy, etc.).

Charakterystyka prądowo-napięciowa (I-V) idealnego złącza p-n



Równanie Shockley'a

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{n k T}} - 1 \right)$$

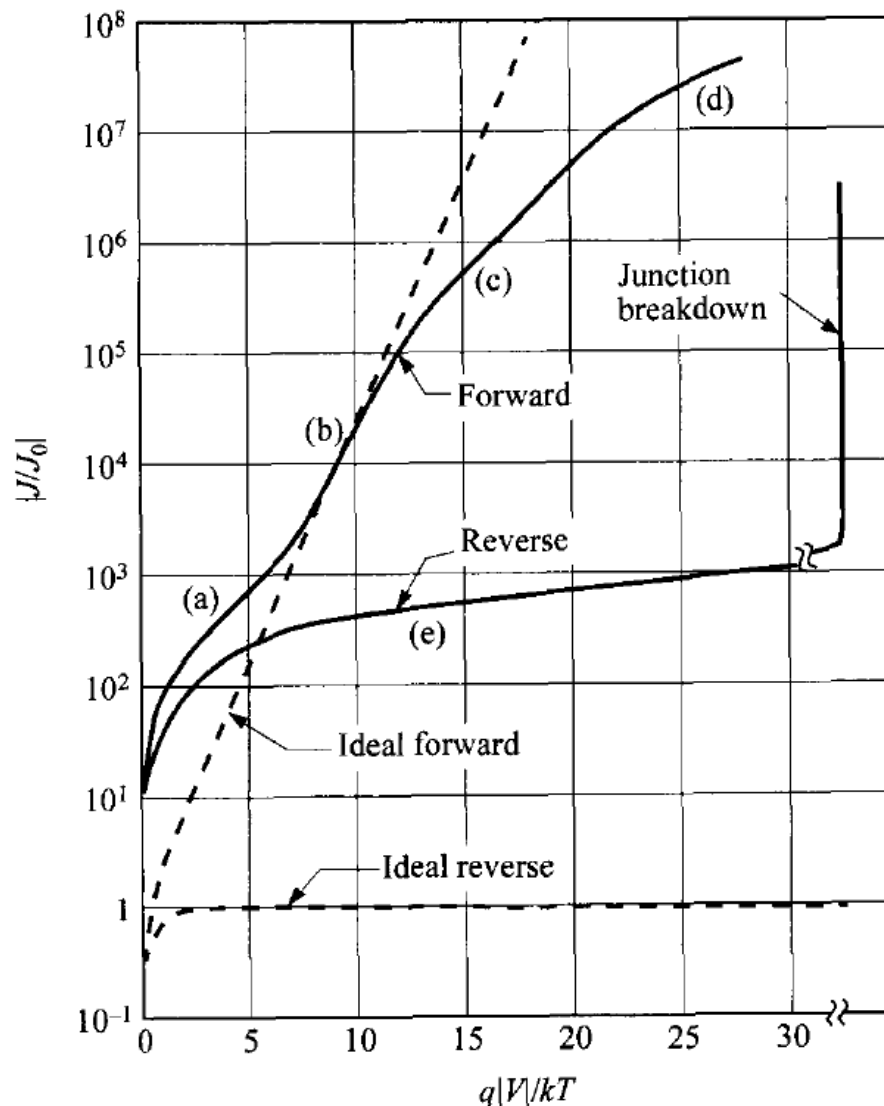
n – współczynnik idealności, $n=1$

$$I_s = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right)$$

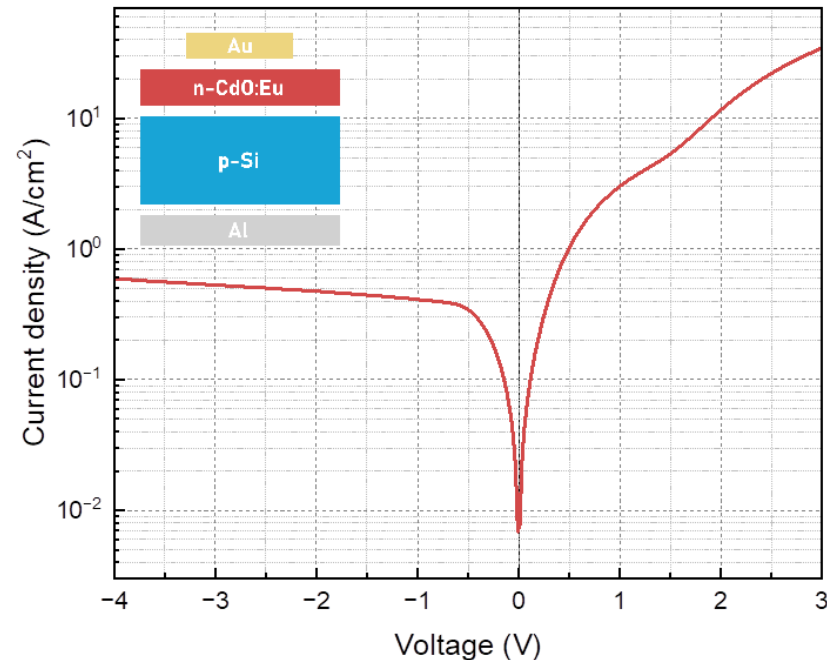
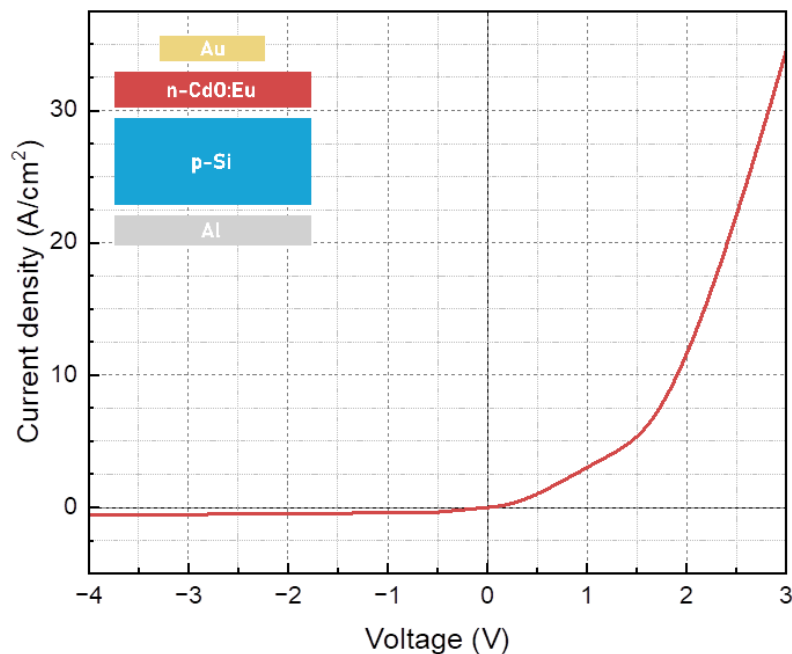
I_s – prąd nasycenia

Charakterystyka I-V w rzeczywistym złączu p-n

- (a) prąd rekombinacji,
- (b) prąd dyfuzyjny,
- (c) prąd przy dużym napięciu w kier. przewodzenia („high injection”)
- (d) wpływ rezystancji szeregowej,
- (e) Prąd upływu



Charakterystyka I-V w rzeczywistym złączu p-n



Równanie Shockley'a

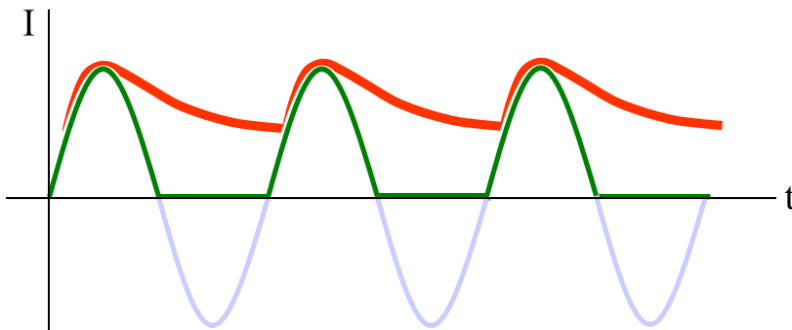
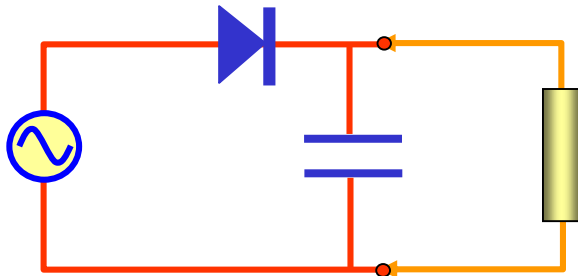
$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right)$$

n – współczynnik idealności, $1 < n < 2$, zależne od materiału;

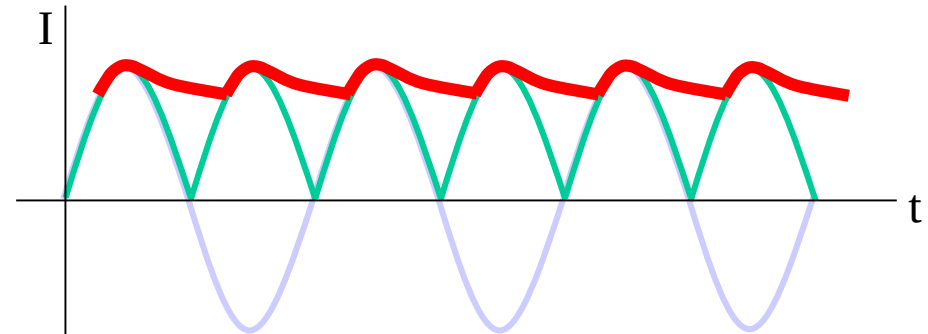
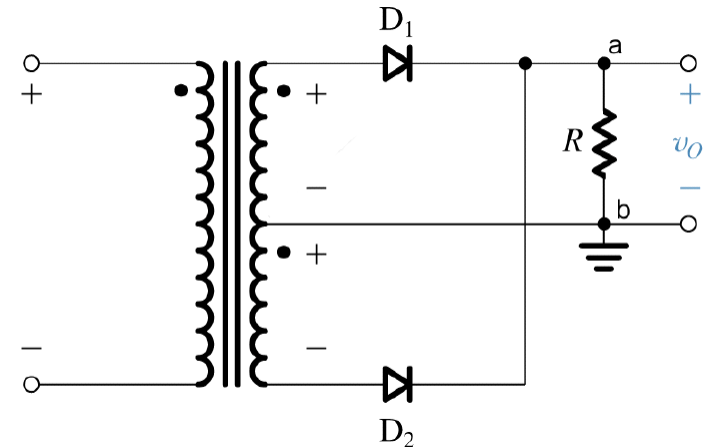
Złącze p-n (dioda półprzewodnikowa) – zastosowania

- **Prostownnik** – jest to układ, który zamienia prąd przemienny na prąd stały

➤ Prostownnik jednopółwkowy

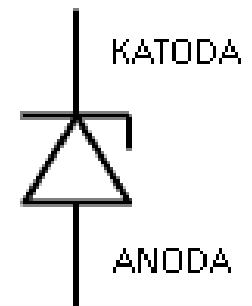
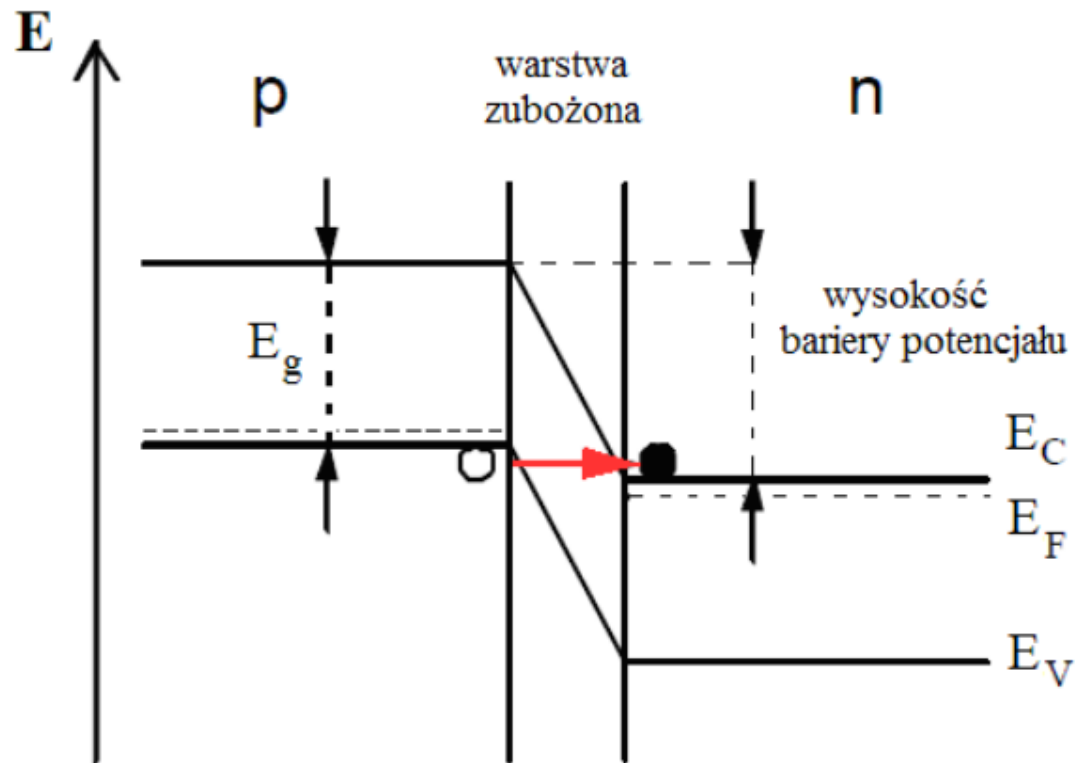


➤ Prostownnik dwupółwkowy



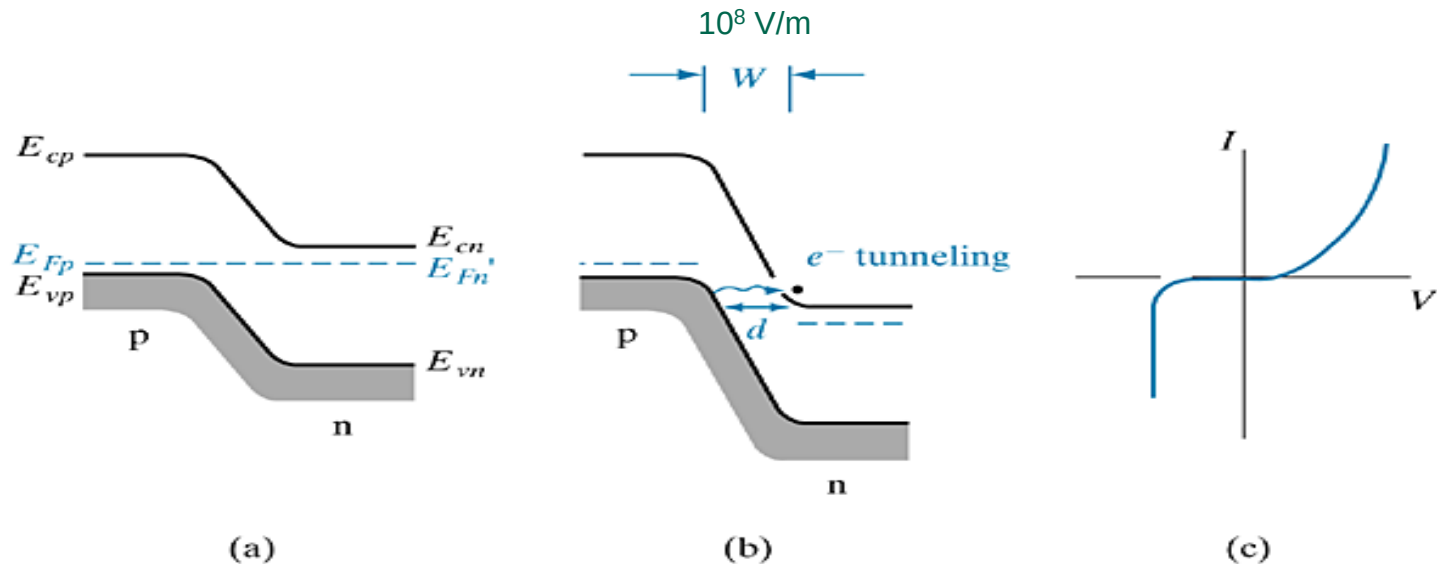
Rys. Przebieg prądu przemiennego na wyjściu prostownika jednopółwkowego (lewa strona) i dwupółwkowego (prawa strona). Przebieg **bez kondensatora** (zielona krzywa) i **z kondensatorem** (czerwona krzywa). Niebieski przebieg sinusoidalny – prąd przemienny na wejściu prostownika.

Dioda Zenera



Efekt Zenera: (a) złącze p-n silnie domieszkowane w równowadze; (b) spolaryzowane napięciem w kierunku zaporowym c) efekt tunelowy: przejście elektronu z pasma walencyjnego po stronie półprzewodnika typu p do pasma przewodnictwa po stronie półprzewodnika typu n **bez zmiany energii.**

Dioda Zenera



(a) Silnie domieszkowane złącze w stanie równowagi; (b) złącze spolaryzowane w kierunku zaporowym : tunelowanie elektronów z p do n; (c) charakterystyka I - V .

W silnie domieszkowanym złączu p-n szerokość obszaru ładunku przestrzennego jest niewielka. Jeśli napięcie polaryzacji wstecznej takiego złącza będzie większe od napięcia Zenera (napięcia przy którym następuje gwałtowny wzrost prądu na skutek jonizacji atomów w obszarze zubożonym), to krawędź pasma walencyjnego obszaru typu p znajdzie się wyżej niż krawędź pasma przewodnictwa obszaru typu n. Dlatego jeśli elektron znajdujący się w paśmie walencyjnym w obszarze typu p przejdzie przez obszar ładunku przestrzennego do obszaru typu n, to bez zmiany energii stanie się tam swobodnym nośnikiem – elektronem znajdującym się w paśmie przewodzenia półprzewodnika typu n. Takie przejście nazywane jest przejściem tunelowym.

Dioda Zenera - charakterystyka I-V

Współczynnik stabilizacji

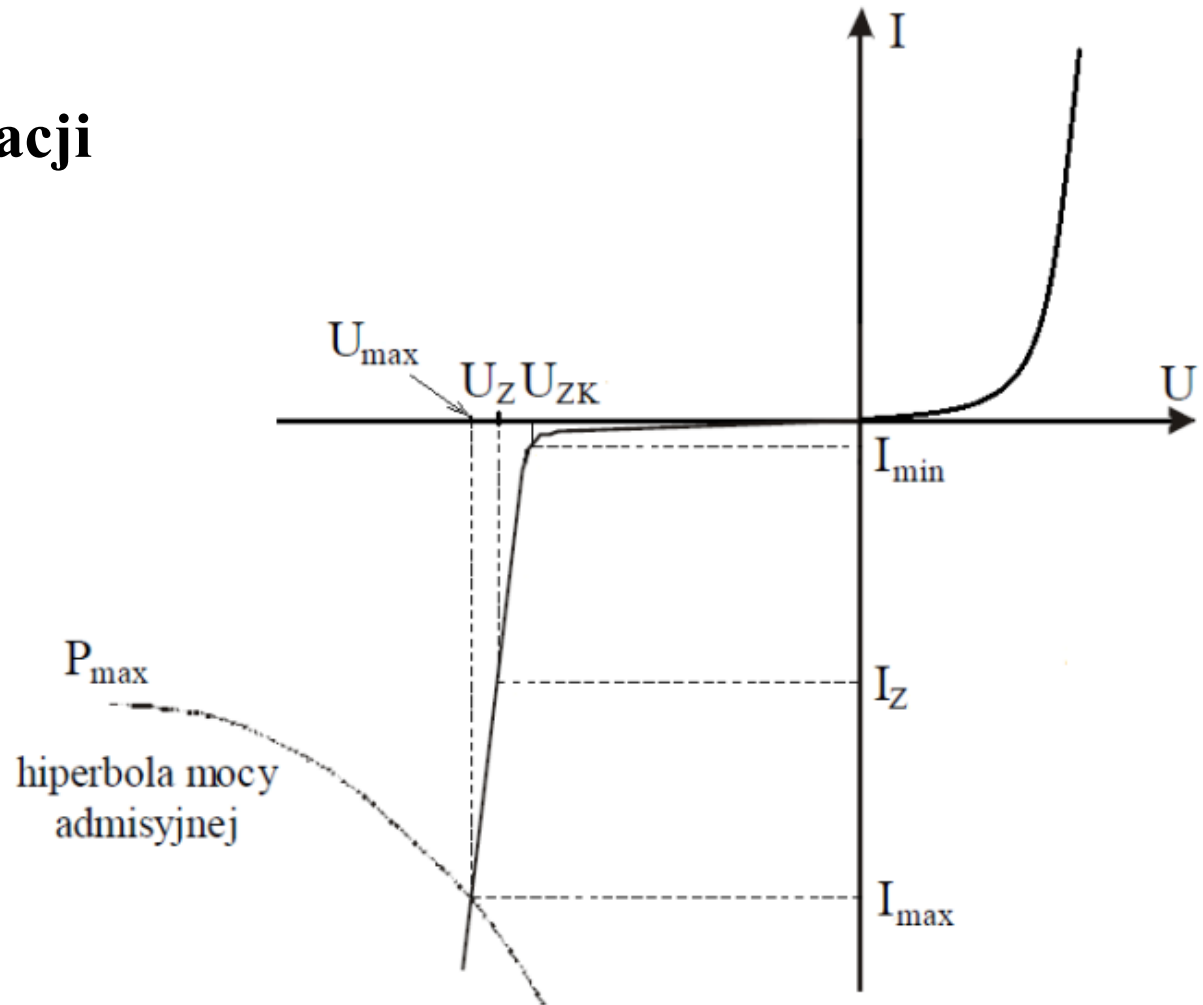
$$S = \frac{\frac{\Delta I_z}{I_z}}{\frac{\Delta U_z}{U_z}}$$

Rezystancja statyczna

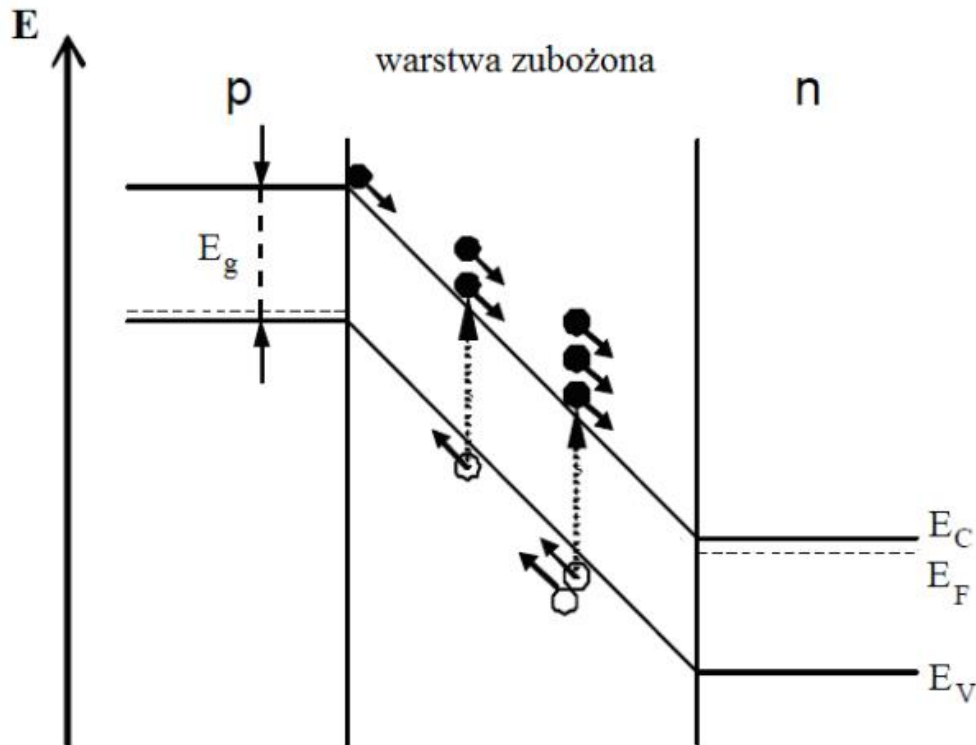
$$R_s = \frac{U_z}{I_z}$$

Rezystancja dynamiczna

$$R_D = \frac{\Delta U_z}{\Delta I_z}$$



Dioda lawinowa

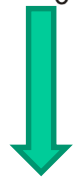
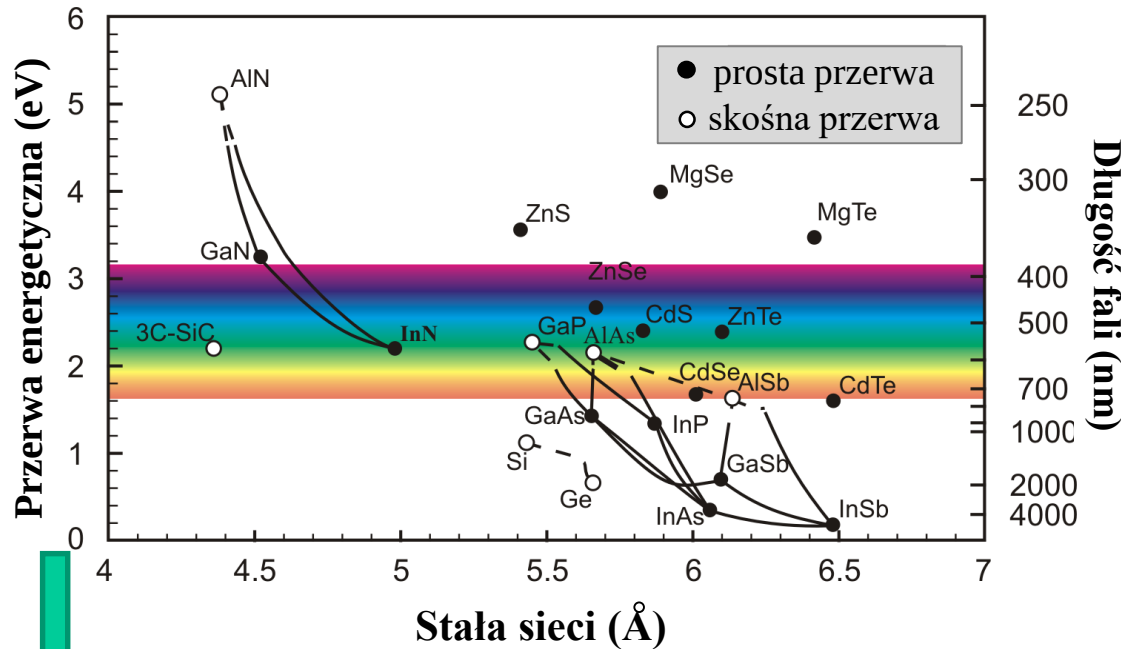


Powielanie lawinowe

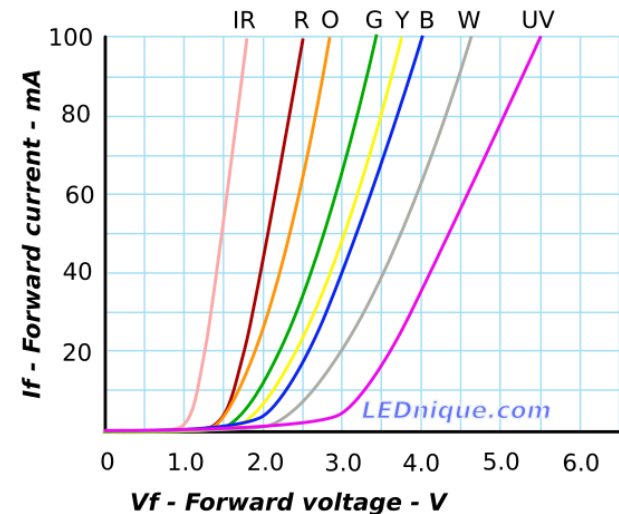
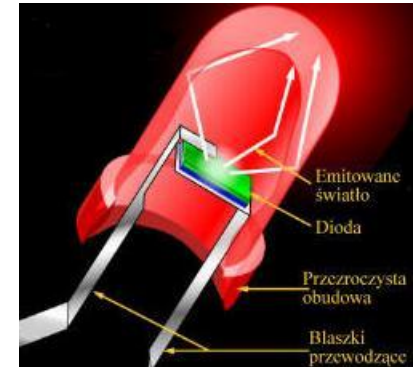
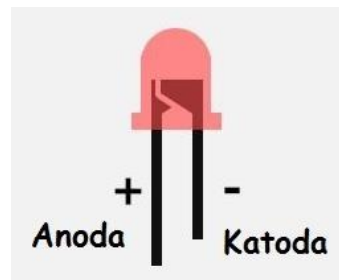
Jeśli napięcie polaryzujące jest odpowiednio duże (a więc obszar zubożony szeroki), to nośniki przechodzące przez obszar zubożony uzyskują dużą energię. Zderzając się z węzłami sieci krystalicznej (z atomami) przekazują im część swojej energii, co powoduje przejście elektronów do pasma przewodnictwa, a co za tym idzie również "utworzenie" dziur - innymi słowy ma miejsce ionizacja. Pojawiają się w ten sposób nowe nośniki, które również są przyspieszane, zderzają się z węzłami sieci, itd. Proces ten nabiera charakteru lawinowego i nazywany jest przebicciem lawinowym.

Dioda elektroluminescencyjna (LED)

Diody elektroluminescencyjne (ang. *light emitting diodes*, LED) – wykonywane są na bazie półprzewodnikowych złączy *p-n*. Działają w oparciu o zjawisko elektroluminescencji, tzn. przetwarzają energię elektryczną na energię promieniowania elektromagnetycznego. Barwa światła, które emitują diody LED, jak również długość fali, zależy od materiału półprzewodnikowego, z którego dioda jest wykonana.



$$E_g = \frac{hc}{\lambda}$$

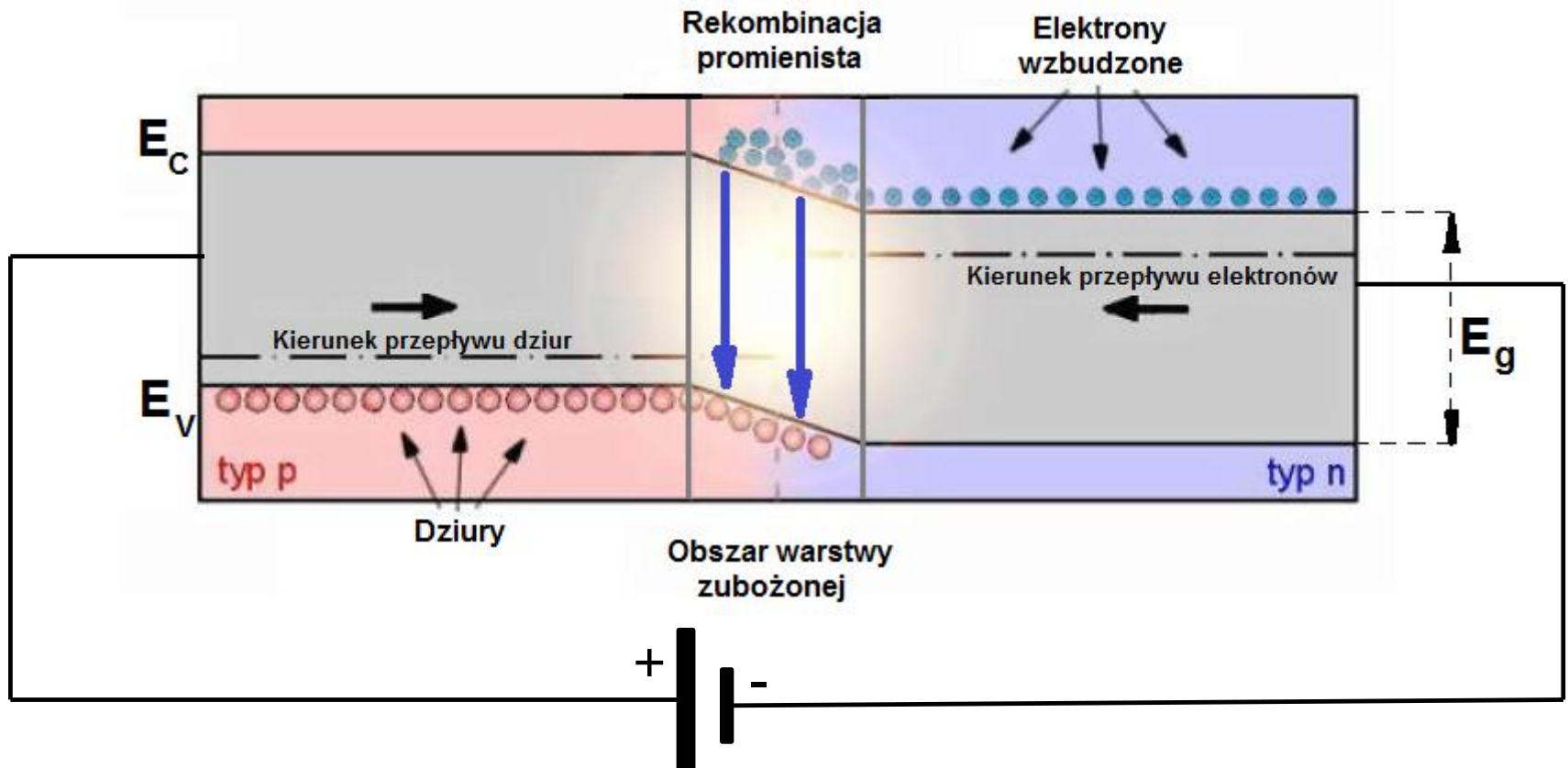


I_f – natężenie prądu w kierunku przewodzenia
 V_f – napięcie polaryzacji w kierunku przewodzenia

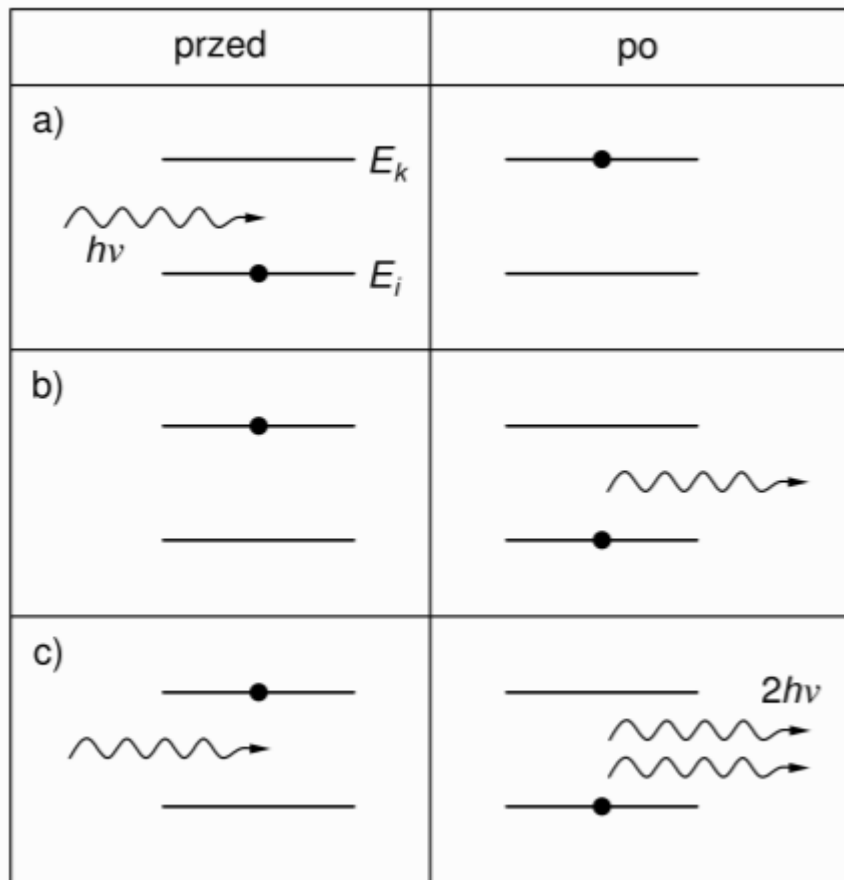
h – stała Plancka, c – prędkość światła, λ – długość fali

Dioda LED – zasada działania

Zjawisko elektroluminescencji, w oparciu o które działają diody LED, polega na wytwarzaniu światła pod wpływem pola elektrycznego (napięcia polaryzacji w kierunku przewodzenia). Elektroluminescencja zachodzi w wyniku **rekombinacji promienistej dziur i elektronów w obszarze warstwy zubożonej** złącza *p-n*. Przejściom elektronów z wyższego poziomu energetycznego na niższy towarzyszy wydzielenie energii w postaci światła.



Laser – zasada działania



Rys. Trzy elementarne procesy opisujące oddziaływanie fotonu z układem kwantowym: a) absorpcja, b) emisja spontaniczna, c) emisja wymuszona. Symbole: E_i – poziom o niższej energii, E_k – poziom o wyższej energii.

W procesie **absorpcji** (rys. a) padający foton o energii $h\nu$ znika, a jego energia idzie na przeniesienie elektronu z poziomu niższego o energii E_i na wyższy E_k .

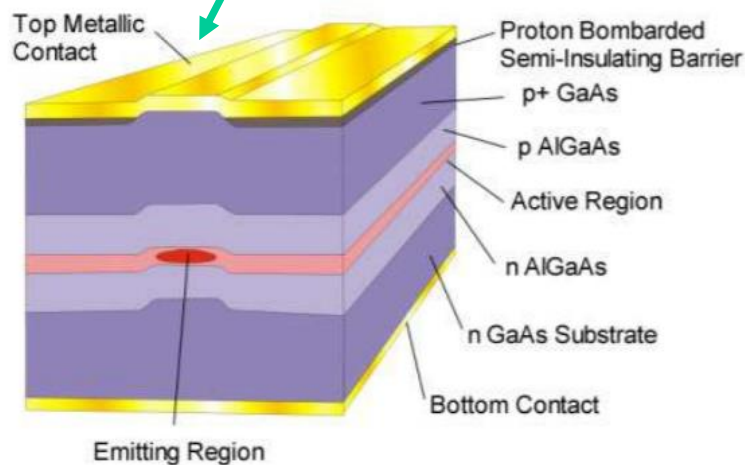
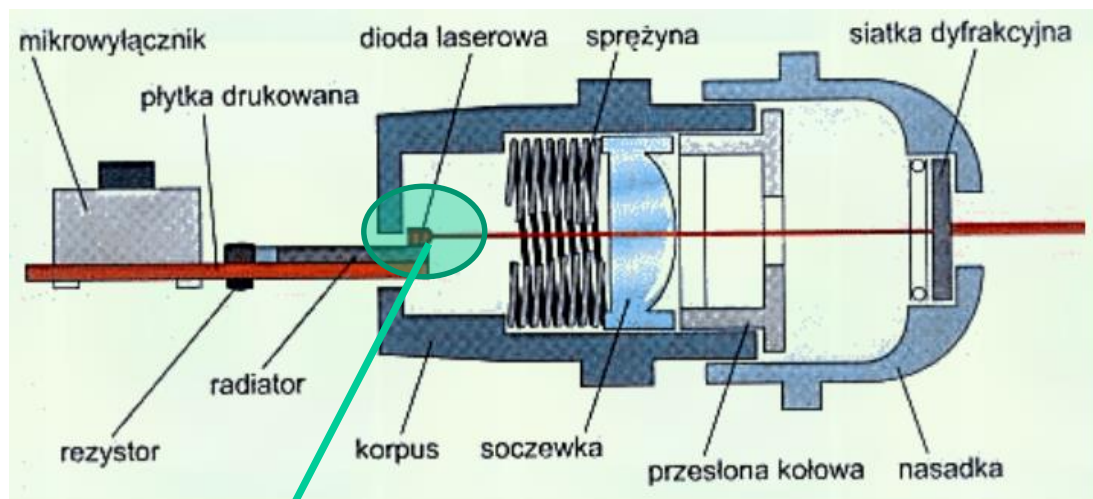
W procesie **emisji spontanicznej** (rys. b) elektron przechodzi z poziomu wyższego na niższy, a różnica energii jest wypromieniowana w formie fotonu.

Działanie lasera opiera się na zjawisku **emisji wymuszonej** (rys. c), w którym padający foton o energii $h\nu$ wymusza przejście układu kwantowego ze stanu o energii wyższej do niższej.

Warunek konieczny na wystąpienie akcji laserowej – **inwersja obsadzeń**, która mówi o tym, że **liczba elektronów w stanie o energii E_k musi być większa od liczby elektronów w stanie o energii E_i** . Uzyskanie stanu, dla którego zachodzi taka inwersja obsadzeń, jest możliwe kosztem energii dostarczonej z zewnątrz. Proces ten zwany jest potocznie **pompowaniem**.

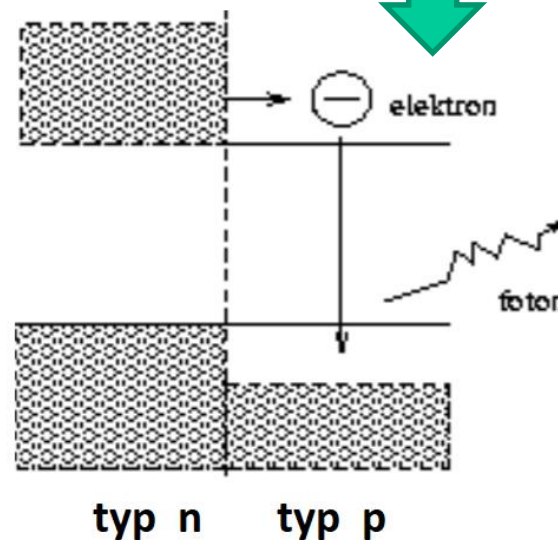
Istnieją dwa rodzaje pompowania w układach laserujących: *elektryczne* i *optyczne*.

Laser półprzewodnikowy – konstrukcja



Rys. Przykład schematu budowy „medium” lasera półprzewodnikowego – tj. złącza p-n.

Inwersję obsadzeń poziomów energetycznych, uzyskuje się poprzez wstrzykiwanie mniejszościowych nośników ładunku do obszaru złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia.



stany energetyczne wypełnione elektronami



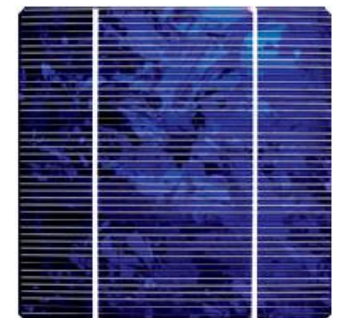
Bateria słoneczna i fotodioda

Fotodioda i ogniwo słoneczne są urządzeniami półprzewodnikowymi, w których zachodzi proces zamiany energii świetlnej fotonów padających na nią w energię elektryczną. Podstawą ich działania jest **efekt fotowoltaiczny**. Poniżej przedstawiono na czym polega ten efekt w półprzewodnikowym złączu *p-n*.

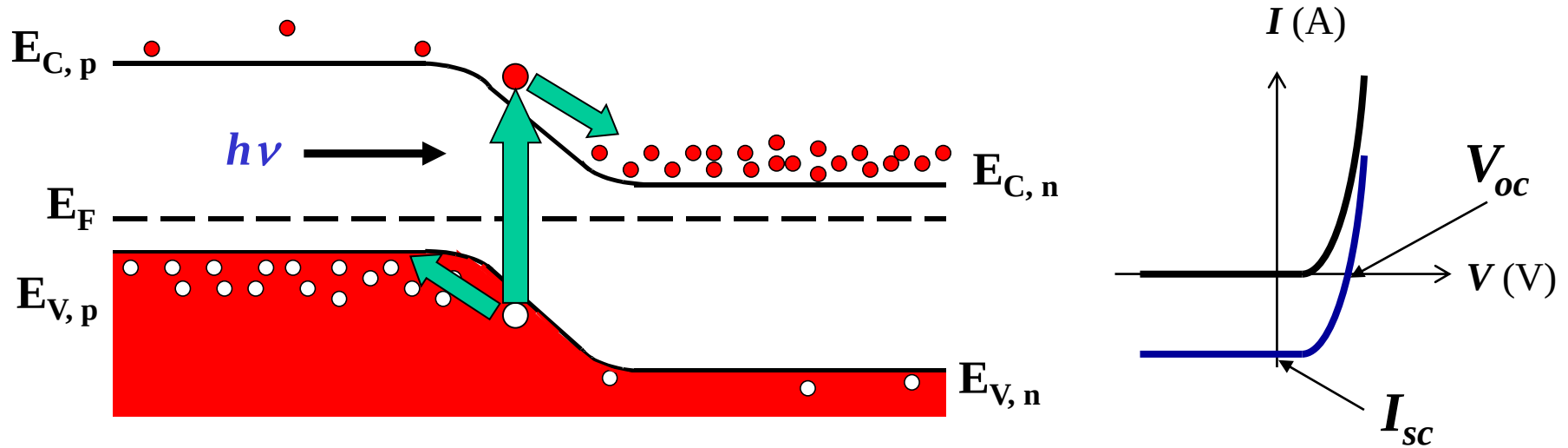
- Światło jest absorbowane dla:

$$h\nu \geq E_g$$

- Tworzą się pary elektron-dziura, które są separowane przez pole w złączu i transportowane przez złącze



Efekt fotowoltaiczny



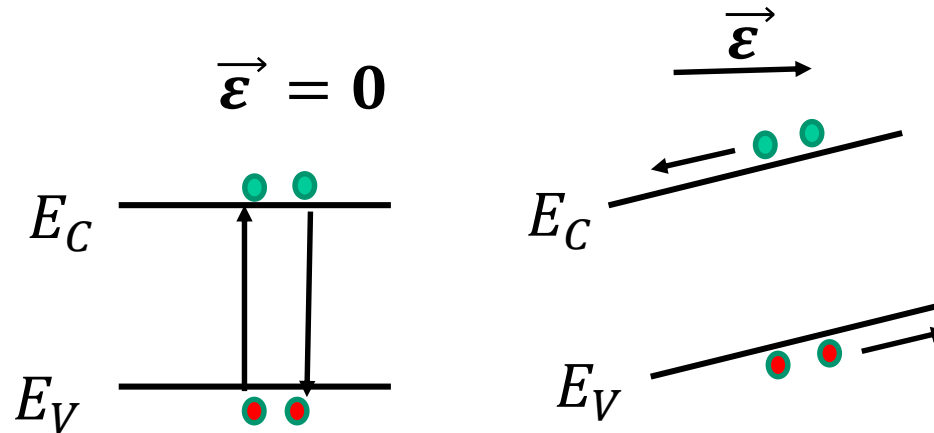
- Padające na fotodiode światło jest absorbowane dla energii $h\nu \geq E_g$.
- W obszarze warstwy zubożonej tworzą się nośniki mniejszościowe, tj. pary elektron-dziura, które są separowane przez wbudowane pole elektryczne w złączu.
- Nośniki mniejszościowe są transportowane przez złącze i powodują wzrost prądu wstecznego, jeśli obwód zewnętrzny złącza jest zwarty. Powstaje wówczas tzw. prąd zwarcia (I_{sc}).
- Jeśli złącze jest rozwarte, to na jego krańcach pojawia się różnica potencjałów – tj. napięcie rozwarcia (V_{oc}).
- To jest właśnie efekt fotowoltaiczny: po oświetleniu złącza można uzyskać źródło prądu lub napięcia, czyli źródło energii elektrycznej.

Warunki wystąpienia efektu fotowoltaicznego

- Pod wpływem promieniowania muszą być generowane w półprzewodniku mniejszościowe nośniki ładunku dodatniego i ujemnego

$$E_f \geq E_g$$

- Nośniki mniejszościowe o różnych znakach muszą być rozdzielone przez wbudowane pole elektryczne w złączu p-n;



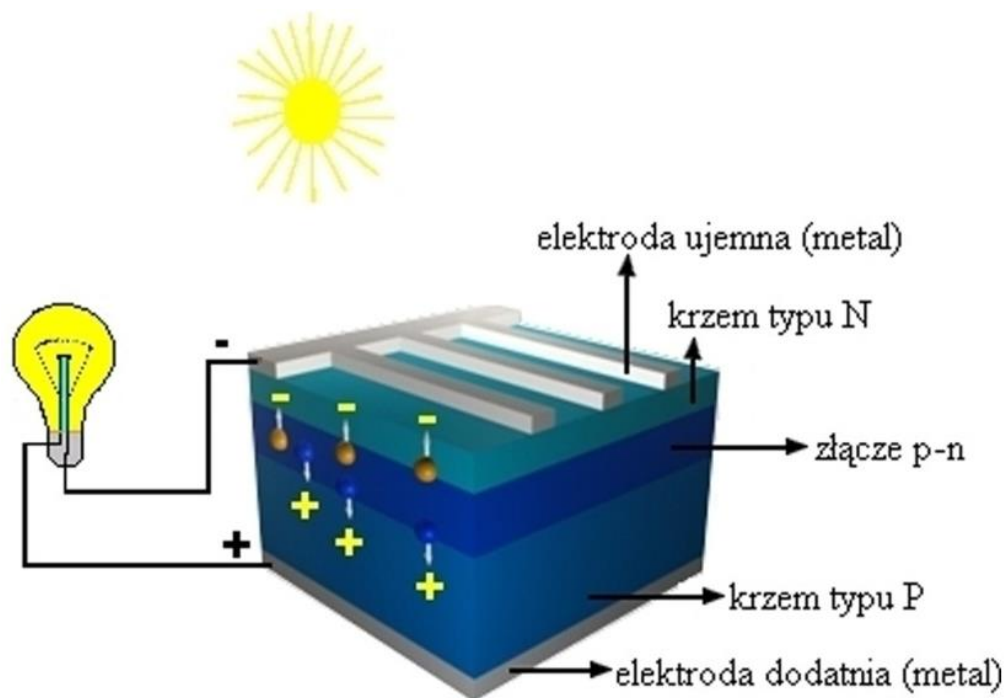
- Generowane swobodne nośniki ładunku muszą zachować swoją ruchliwość dostatecznie długo, tak aby zdążyły być rozdzielone przez pole elektryczne złącza p-n zanim zrekombinują do stanu podstawowego.

Ogniwo słoneczne – zasada działania

- Przyrząd, który zamienia energię słoneczną w energię elektryczną:

$$P = I_{sc} \times V_{oc} = I^2 \times R = U^2/R$$

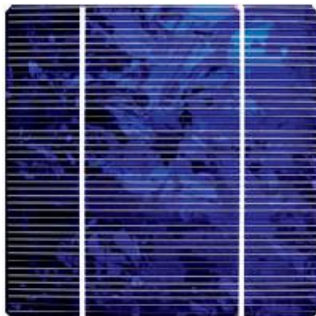
- Można porównywać go do baterii, bo dostarcza mocy prądu stałego.
- Różni się od baterii tym, że napięcie, które wytwarza zależy od oporności obciążenia R.



Baterie słoneczne

I Generacji - Krzemowe (Si)

- Monokrystaliczny Si
- Poli-(multi) krystaliczny Si



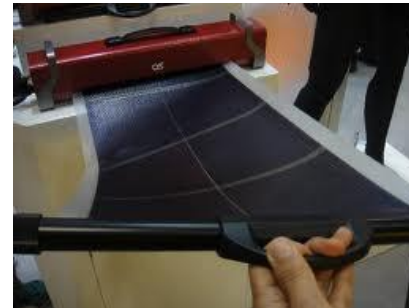
II Generacji - Cienkowarstwowe

- Tellurek kadmu (CdTe)
- CIGS (Cu-In-Ga-Se)
- Amorficzny Si



III Generacji

- Ogniwa wielozłączone
- Ogniwa polimerowe i organiczne
- Na nanorurkach węglowych
- Z kropkami kwantowymi
- Barwnikowe

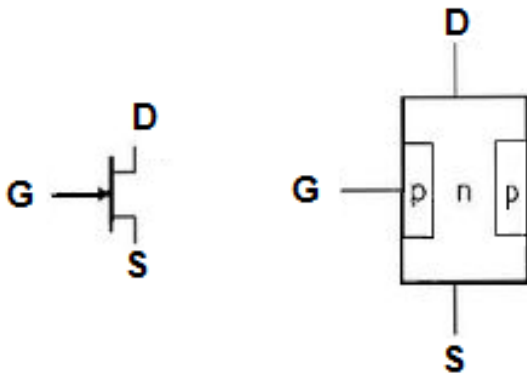


Tranzystor polowy JFET - budowa

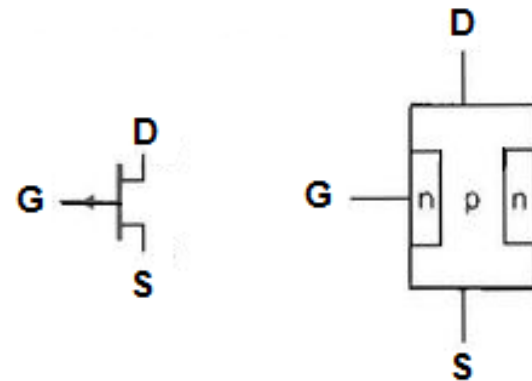


Tranzystor polowy JFET (ang. *Junction Field Effect Transistor*) – przyrząd półprzewodnikowy, w którym sterowanie prądem odbywa się za pomocą pola elektrycznego (napięcia). Tranzystor polowy JFET składa się z warstwy półprzewodnika typu n (tranzystor z kanałem typu n) lub typu p (tranzystor z kanałem typu p) oraz wbudowanej w nią, silnie domieszkowanej warstwy półprzewodnika przeciwnego typu (odpowiednio p lub n). Tak więc tranzystor zbudowany jest na bazie złącza n - p - n lub p - n - p . Na zewnątrz obudowy wyprowadzone są trzy końcówki: **dren** (ang. drain, ozn. D); **źródło** (ang. source, ozn. S) oraz **bramka** (ang. gate, ozn. G)

(a) Tranzystor z kanałem typu n

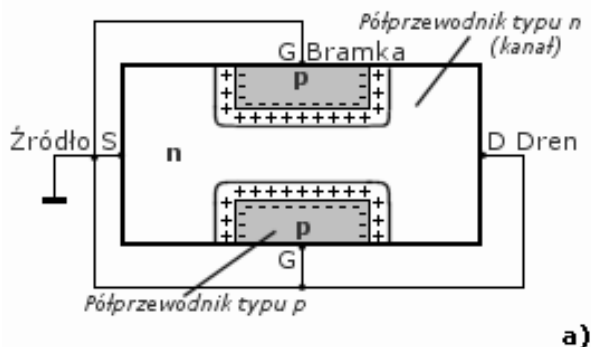


(b) Tranzystor z kanałem typu p

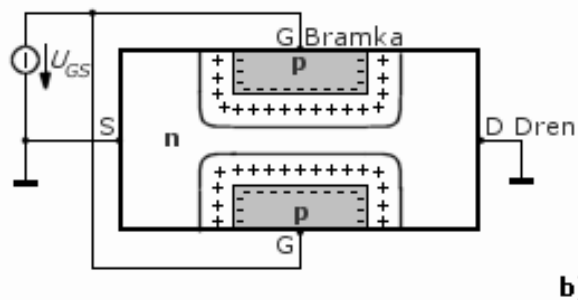


Rys. Symbole graficzne i budowa tranzystorów JFET.

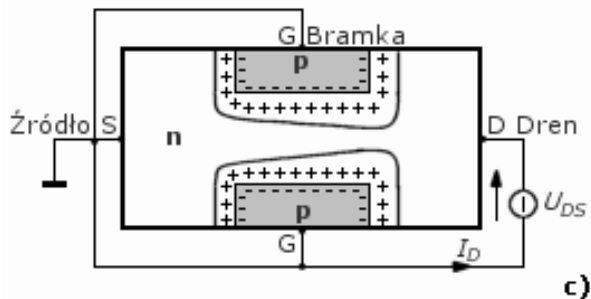
Tranzystor polowy JFET – zasada działania



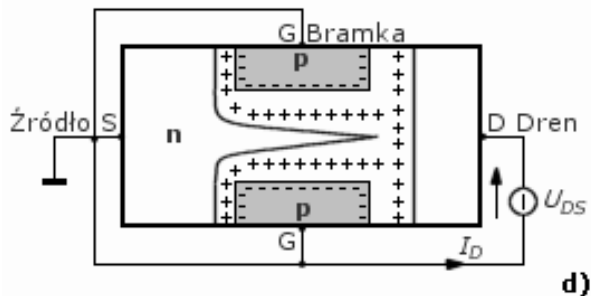
a)



b)



c)



d)

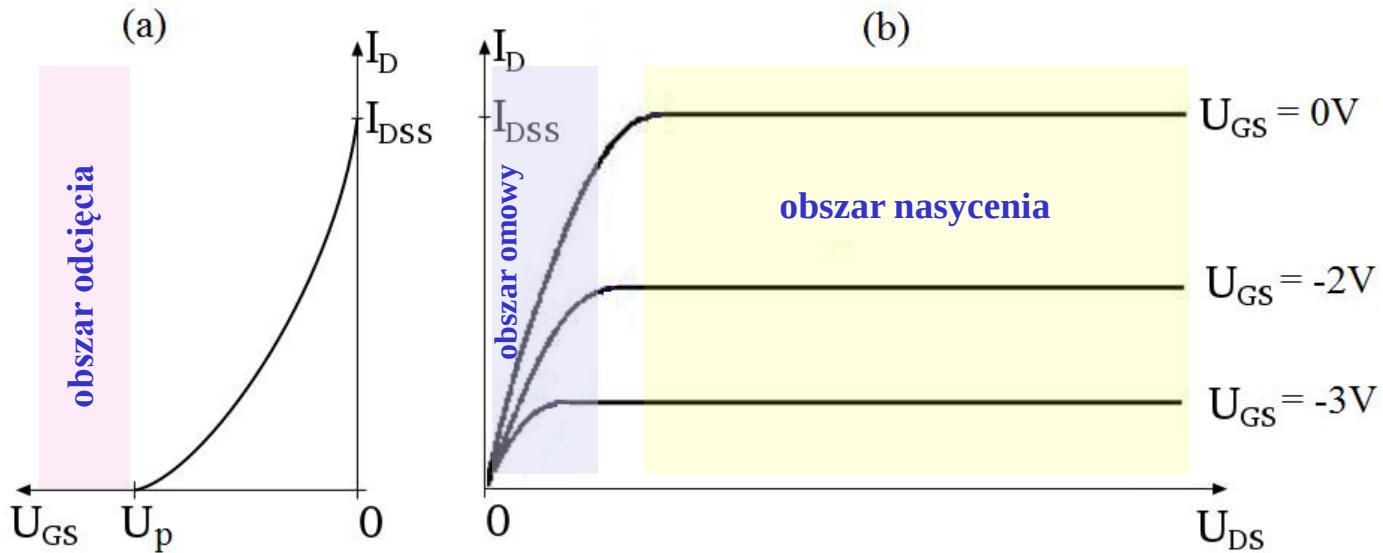
Rys. a) Obszar półprzewodnika występujący między drenem (D) i źródłem (S) stanowi kanał, przez który płynie prąd. Zmianę przekroju kanału uzyskuje się przez rozszerzenie lub zwężenie warstwy zubożonej złącza p-n, a więc przez zmianę **napięcia bramka-źródło (U_{GS})** polaryzującego to złącze w kierunku zaporowym.

Rys. b) Pod wpływem napięcia U_{GS} szerokość warstwy zubożonej zwiększy się, z kolei przekrój kanału zmniejszy się. Łatwo można sobie wyobrazić, że dalsze zwiększanie napięcia U_{GS} w kierunku zaporowym spowoduje, że warstwy zubożone połączą się i kanał zostanie zamknięty.

Rys. c) Gdy doprowadzone jest **napięcie dren-źródło (U_{DS})**, przy zachowaniu tego samego napięcia U_{GS} , w pobliżu drenu warstwa zaporowa jest szersza niż w pobliżu źródła. Jest to spowodowane tym, że złącze p-n wzdłuż kanału jest polaryzowane różnymi napięciami.

Rys. d) Dalszy wzrost napięcia U_{DS} powoduje dalsze rozszerzanie warstwy zubożonej aż do zamknięcia kanału, co powoduje stan nasycenia. W takiej sytuacji dalszy wzrost napięcia U_{DS} nie będzie powodował praktycznie dalszego wzrostu **prądu drenu I_D** .

Charakterystyki tranzystora polowego JFET



Rys. (a) Charakterystyka przejściowa tranzystora JFET, U_p – napięcie odcięcia, (b) charakterystyki wyjściowe tranzystora JFET, I_{DSS} – prąd nasycenia.

Obszary pracy tranzystora JFET:

- **obszar odcięcia:** tranzystor jest wyłączony. Nie ma przepływu prądu ($I_D = 0$) przez kanał. Dzieje się to przy napięciu bramka-źródło $U_{GS} > U_p$
- **obszar nasycenia (aktywny):** tranzystor jest włączony. Prąd drenu osiąga stan nasycenia (I_{DSS}), tzn. jest niezależny od napięcia U_{DS} , jest kontrolowany przez napięcie U_{GS} . W tym obszarze tranzystor może pracować jako wzmacniacz
- **obszar omowy:** tranzystor jest włączony ale pracuje jak rezystor o oporności kontrolowanej napięciem. Dzieje się to wówczas, gdy napięcie U_{DS} jest mniejsze niż w obszarze aktywnym. Prąd drenu jest proporcjonalny do napięcia U_{DS} i jest kontrolowany przez napięcie bramki U_{GS} .